

Инженерная школа энергетики
 Направление подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника
 Отделение электроэнергетики и электротехники

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
Разработка общих принципов построения автоматического устройства синхронизации выделенных энергорайонов с сетью энергосистемы

УДК 621.311:621.316.729

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5А6Г	Потапенко Елизавета Юрьевна		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЭЭ ИШЭ	Абеуов Р.Б.	к. т. н., доцент		

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШБИП	Подопригора И.В.	к. э. н., доцент		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент ООД	Мезенцева И.Л.			

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
13.03.02 Электроэнергетика и электротехника	Шестакова В.В.	к.т.н., доцент		

Планируемые результаты обучения по ООП «Электроэнергетика»

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)	Требования ФГОС, критериев и/или заинтересованных сторон
<i>Универсальные компетенции</i>		
P1	<i>Совершенствовать</i> и развивать свой интеллектуальный и общекультурный уровень, добиваться нравственного и физического совершенствования своей личности, обучению новым методам исследования, к изменению научного и научно-производственного профиля своей профессиональной деятельности.	Требования ФГОС (ОК-1, 3; ОПК-1, 2), Критерий 5 АИОР (п. 2.1, 2.5), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i> , работодателей
P2	<i>Свободно пользоваться русским и иностранным языками</i> как средством делового общения, способностью к активной социальной мобильности.	Требования ФГОС (ОПК-3), Критерий 5 АИОР (п. 2.2), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i> , работодателей
P3	<i>Использовать</i> на практике навыки и умения в организации научно-исследовательских и производственных работ, в управлении коллективом, использовать знания правовых и этических норм при оценке последствий своей профессиональной деятельности.	Требования ФГОС (ОК-2, 3; ОПК-1; ПК-1, 2, 3), Критерий 5 АИОР (п. 2.6), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i> , работодателей
P4	<i>Использовать</i> представление о методологических основах научного познания и творчества, роли научной информации в развитии науки, готовностью вести работу с привлечением современных информационных технологий, синтезировать и критически резюмировать информацию.	Требования ФГОС (ОК-3; ОПК-1, 4), Критерий 5 АИОР (п. 1.6, 2.3), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i> , работодателей
<i>Профессиональные компетенции</i>		
P5	<i>Применять углубленные естественнонаучные, математические, социально-экономические и профессиональные знания</i> в междисциплинарном контексте в инновационной инженерной деятельности, связанной с автоматизированными системами диспетчерского управления в электроэнергетике.	Требования ФГОС (ОПК-4; ПК-4-6)*, Критерий 5 АИОР (п.1.1), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i> , работодателей
P6	Ставить и решать инновационные задачи инженерного анализа при проектировании, эксплуатации и обслуживании автоматизированных систем диспетчерского управления электроэнергетических систем с использованием глубоких фундаментальных и специальных знаний, аналитических методов и сложных моделей в условиях неопределенности.	Требования ФГОС (ПК-1, 7,8). Критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i> , работодателей
P7	Выполнять инновационные инженерные проекты по разработке аппаратных и программных средств автоматизированных систем диспетчерского управления электроэнергетических систем с использованием современных методов проектирования и передового опыта разработки конкурентоспособных систем.	Требования ФГОС (ПК-2, 9, 10, 11). Критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i> , работодателей
P8	Проводить инновационные инженерные исследования в области автоматизированных систем управления электроэнергетических систем, включая критический	Требования ФГОС (ПК-3, 13, 14, 15, 24-26). Критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями

* Указаны коды компетенций по ФГОС (направление 13.04.02 – Электроэнергетика и электротехника), утвержденному Приказом Министерства образования и науки РФ № 1500 от 21.11.2014 г.

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)	Требования ФГОС, критериев и/или заинтересованных сторон
	анализ данных из мировых информационных ресурсов.	международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i> .
P9	Проводить <i>технико-экономическое обоснование</i> проектных решений; осуществлять профессиональную деятельность руководствуясь требованиями стандартов и рынка; разрабатывать планы и программы организации профессиональной деятельности на предприятии; определять и обеспечивать эффективные режимы технологического процесса.	Требования ФГОС (ПК-11, 12, 13, 16-20, 24, 26), Критерий 5 АИОР (п. 1.5, 2.1), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i> , <i>работодателей</i>
P10	Проводить <i>монтажные, регулировочные, испытательные, наладочные</i> работы оборудования и программного обеспечения по профилю профессиональной деятельности.	Требования ФГОС (ПК-22, 23, 25, 26), Критерий 5 АИОР (п. 1.5), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i> , <i>работодателей</i>
P11	<i>Осваивать новое оборудование и программное обеспечение в сфере автоматизации диспетчерского управления;</i> проверять техническое состояние и остаточный ресурс эксплуатируемых программно-технических комплексов и организовывать профилактический осмотр и текущий ремонт.	Требования ФГОС (ПК-27, 28), Критерий 5 АИОР (п. 1.4), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i> , <i>работодателей</i>
P12	Разрабатывать рабочую <i>проектную и научно-техническую документацию</i> в соответствии со стандартами, техническими условиями и другими нормативными документами; организовывать метрологическое обеспечение электроэнергетического и электротехнического оборудования; составлять <i>оперативную документацию</i> , предусмотренную правилами технической эксплуатации оборудования и организации работы.	Требования ФГОС (ПК-29, 30), Критерий 5 АИОР (п. 1.3, 2.1), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i> , <i>работодателей</i>

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
 федеральное государственное автономное
 образовательное учреждение высшего образования
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Инженерная школа энергетики
 Направление подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника
 Отделение электроэнергетики и электротехники

УТВЕРЖДАЮ:
 Руководитель ООП

_____ Шестакова В.В.
 (Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ **на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

бакалаврской работы

(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
5А6Г	Потапенко Елизавете Юрьевне

Тема работы:

Разработка общих принципов построения автоматического устройства синхронизации выделенных энергорайонов с сетью энергосистемы	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	10.02.2020 г № 41-35/с

Срок сдачи студентом выполненной работы:	05.06.2020 г.
--	---------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе <i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Исследуемая модель энергорайона с сетью энергосистемы; 2. Исходные параметры схемы: параметры генерирующих узлов; мощность нагрузки в узлах схемы; каталожные данные трансформаторов; параметры проводов ВЛ.
--	--

<p>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</p> <p><i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<p>Глава 1. Предметная область и задачи исследования</p> <p>1.1 Проблемы эксплуатации существующих систем автоматической синхронизации подсистем ЭЭС</p> <p>1.2 Современные способы и устройства автоматической синхронизации подсистем ЭЭС</p> <p>1.3 Задачи разработки и реализации современных систем автоматической синхронизации подсистем ЭЭС</p> <p>1.4 Заключение по главе 1</p> <p>Глава 2. Теоретические основы построения систем автоматической синхронизации подсистем ЭЭС на основе принципа управления по программным траекториям движения технических объектов</p> <p>2.1 Основы общей теории управления движением технических объектов</p> <p>2.2 Основы построения программных траекторий движения генераторов и подсистем ЭЭС</p> <p>2.3 Расчет управлений при автоматической синхронизации подсистем ЭЭС</p> <p>2.4 Применение принципа адаптивности для решения задач автоматической синхронизации подсистем ЭЭС</p> <p>2.5 Заключение по главе 2</p> <p>Глава 3. Общие принципы построения автоматического устройства синхронизации</p> <p>3.1 Алгоритм работы автоматического устройства синхронизации</p> <p>3.2 Структурно-функциональная схема автоматического устройства синхронизации</p> <p>3.3 Аппаратная реализация автоматического устройства синхронизации</p> <p>3.4 Заключение по главе 3</p> <p>Глава 4. Моделирование процесса автоматической синхронизации выделенных энергорайонов с сетью энергосистемы</p> <p>4.1 Моделирование процесса автоматической синхронизации выделенных энергорайонов с сетью энергосистемы</p> <p>4.2 Основные технические требования к устройству точной синхронизации</p> <p>4.3 Заключение по главе 4</p>
<p>Перечень графического материала</p> <p><i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	<p>Демонстрационный материал (презентация в MS Power Point)</p>
<p>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</p> <p><i>(с указанием разделов)</i></p>	

Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	к.э.н., доцент Подопригора И.В.
Социальная ответственность	ассистент Мезенцева И.Л.
Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках: нет	

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	17.02.2020 г.
---	---------------

Задание выдал руководитель / консультант (при наличии):

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЭЭ ИШЭ	Абеуов Р.Б.	к. т. н., доцент		17.02.2020 г.

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5А6Г	Потапенко Е.Ю.		17.02.2020 г.

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

Группа	ФИО
5А6Г	Потапенко Елизавете Юрьевне

Школа	Инженерная школа энергетики	Отделение школы	Электроэнергетики и электротехники
Уровень образования	бакалавриат	Направление	13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	Стоимость материалов и оборудования; Трудоемкость работы
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	Нормы амортизации
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	Отчисления в социальные фонды

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	Технико-экономическое обоснование НИИ, SWOT-анализ, определение срока сравнения конкурентных решений
2. Планирование и формирование бюджета научных исследований	Планирование работ по НИИ Расчет бюджета НИИ
3. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	Определение научно-технического уровня НИИ

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. Оценка конкурентоспособности технических решений
2. Матрица SWOT
3. Альтернативы проведения НИИ
4. График проведения и бюджет НИИ
5. Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НИИ

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	17.02.2020 г.
--	---------------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШБИП	Подопригора И.В.	к. э. н., доцент		17.02.2020 г.

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5А6Г	Потапенко Е.Ю.		17.02.2020 г.

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
5А6Г	Потапенко Елизавете Юрьевне

Школа	Инженерная школа энергетики	Отделение школы	Электроэнергетики и электротехники
Уровень образования	бакалавриат	Направление	13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

<p>1. Описание рабочего места (рабочей зоны, технологического процесса, механического оборудования) на предмет возникновения:</p> <ul style="list-style-type: none"> – вредных проявлений факторов производственной среды (метеоусловия, вредные вещества, освещение, шумы, вибрации, электромагнитные поля, ионизирующие излучения) – опасных проявлений факторов производственной среды (механической природы, термического характера, электрической, пожарной и взрывной природы) – негативного воздействия на окружающую природную среду (атмосферу, гидросферу, литосферу) – чрезвычайных ситуаций (техногенного, стихийного, экологического и социального характера) 	<p>Предметом исследования является разработка алгоритма работы, структурно-функциональной схемы, а также моделирование работы устройства синхронизации, применяемого для быстрого включения на параллельную работу энергорайон с энергосистемой</p>
2. Перечень законодательных и нормативных документов по теме	

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

<p>1. Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности:</p> <ul style="list-style-type: none"> – физико-химическая природа вредности, её связь с разрабатываемой темой; – действие фактора на организм человека; – приведение допустимых норм с необходимой размерностью (со ссылкой на соответствующий нормативно-технический документ); – предлагаемые средства защиты (сначала коллективной защиты, затем – индивидуальные защитные средства) 	<p>Вредные факторы: отклонение показателей микроклимата, превышение уровня шума, повышенный уровень электромагнитных излучений, поражение электрическим током</p>
<p>2. Анализ выявленных опасных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности</p> <ul style="list-style-type: none"> – механические опасности (источники, средства защиты); – термические опасности (источники, средства защиты); – электробезопасность (в т.ч. статическое электричество, молниезащита – источники, средства защиты); – пожаровзрывобезопасность (причины, профилактические мероприятия, первичные средства пожаротушения) 	<p>Опасные факторы: поражение электрическим током</p>

3. Охрана окружающей среды: <ul style="list-style-type: none"> – защита селитебной зоны – анализ воздействия объекта на атмосферу (выбросы); – анализ воздействия объекта на гидросферу (сбросы); – анализ воздействия объекта на литосферу (отходы); – разработать решения по обеспечению экологической безопасности со ссылками на НТД по охране окружающей среды. 	Воздействие объекта на литосферу – отходы и утилизация
4. Защита в чрезвычайных ситуациях: <ul style="list-style-type: none"> – перечень возможных ЧС на объекте; – выбор наиболее типичной ЧС; – разработка превентивных мер по предупреждению ЧС; – разработка мер по повышению устойчивости объекта к данной ЧС; – разработка действий в результате возникшей ЧС и мер по ликвидации её последствий 	Возможные ЧС: землетрясения, ураганы, терроризм; Наиболее типичная ЧС: пожар
5. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности: <ul style="list-style-type: none"> – специальные (характерные для проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны 	<ul style="list-style-type: none"> – ГОСТ Р 12.0.007-2009 – ГОСТ 50923-96 – ГОСТ 21889-76 – ТК РФ
Перечень графического материала:	
При необходимости представить эскизные графические материалы к расчётному заданию (обязательно для специалистов и магистров)	

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	17.02.2020 г.
---	---------------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент ООД	Мезенцева И.Л.			17.02.2020 г.

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5А6Г	Потапенко Е.Ю.		17.02.2020 г.

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 86 с., 10 рис., 18 табл., 25 источников, 1 прил.

Ключевые слова: точная синхронизация, автоматическое устройство синхронизации, энергорайон, энергосистема, синхронный генератор.

Объектом исследования является (ются) автономно работающий энергорайон с электростанцией малой мощности.

Цель работы – разработка общих принципов построения автоматического устройства синхронизации выделенных энергорайонов с сетью энергосистемы.

В процессе исследования проводилось моделирование в ПК MATLAB SIMULINK.

В результате исследования разработан алгоритм и структурно-функциональная схема автоматического устройства синхронизации.

Основные конструктивные, технологические и технико-эксплуатационные характеристики: наличие вычислительного и распределительного модулей.

Степень внедрения: требует дополнительных технологических решений.

Область применения: генератор подстанции.

Экономическая эффективность/значимость работы: внедрение устройства позволит существенно повысить эффективность включения на параллельную работу энергорайона с энергосистемой, сократить время синхронизации для поддержания непрерывного электроснабжения потребителей, тем самым уменьшить финансовые затраты.

В будущем планируется применение результатов работы в электротехнической промышленности, проектных и эксплуатирующих организациях.

Принятые сокращения

АРВ – автоматический регулятор возбуждения;

АРЧВ – автоматический регулятор частоты вращения;

АС – аппаратура связи;

АТМ – аппаратура телемеханики;

ВОЛС – волоконно-оптическая линия связи;

ПТД – программная траектория движения;

СУ – система управления;

УТС – устройство точной синхронизации;

УВ – управляющее воздействие;

ЦП – центр питания;

ЭЭС – энергосистема

Содержание

Введение	16
Глава 1. Предметная область и задачи исследования	18
1.1 Проблемы эксплуатации существующих систем автоматической синхронизации подсистем ЭЭС	18
1.2 Современные способы и устройства автоматической синхронизации подсистем ЭЭС	22
1.3 Задачи разработки и реализации современных систем автоматической синхронизации подсистем	25
1.4 Заключение по главе 1	27
Глава 2. Теоретические основы построения систем автоматической синхронизации подсистем ЭЭС на основе принципа управления по программным траекториям движения технических объектов	29
2.1 Основы общей теории управления движения технических объектов	29
2.2 Основы построения программных траекторий движения генераторов и подсистем электроэнергетических систем	31
2.3 Расчет управлений при автоматической синхронизации подсистем электроэнергетических систем	36
2.4 Применение принципа адаптивности для решения задач автоматической синхронизации подсистем ЭЭС	40
2.5 Заключение по главе 2	41
Глава 3. Общие принципы построения многофункционального устройства синхронизации.....	42
3.1 Алгоритм работы автоматического устройства синхронизации.....	43
3.3 Аппаратная реализация многофункционального устройства синхронизации.....	47
3.4 Заключение по главе 3	48
Глава 4. Моделирование процесса автоматической синхронизации выделенных энергорайонов с сетью энергосистемы	49
4.1 Основные технические требования к устройству точной синхронизации	53
4.2 Заключение по главе 4	53

Глава 5. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.....	54
5.1 Анализ конкурентоспособности технического решения.....	54
5.2 SWOT-анализ	56
5.3 Планирование работ по НТИ	58
5.4 Расчет бюджета НТИ.....	61
5.5 Формирование бюджета затрат на разработку проекта.....	65
5.6 Анализ и оценка научно-технического уровня НИР	66
5.7 Заключение по главе 5	67
Глава 6. Социальная ответственность.....	69
6.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	69
6.2 Производственная безопасность	71
6.3 Поражение электрическим током	75
6.4 Экологическая безопасность	76
6.5 Безопасность в чрезвычайных ситуациях.....	78
6.6 Заключение по главе 6	80
Заключение	81
Список используемых источников.....	82
Приложение А	85

Введение

В настоящее время большое развитие получили электростанции малой мощности, работающие автономно. Для обеспечения резерва мощности автономные системы имеют связи с единой энергосистемой. Для поддержания непрерывного электроснабжения потребителей необходима немедленная синхронизация образовавшегося дефицитного энергорайона с единой энергосистемой, в случае выхода из строя генерирующих частей автономно-работающих электростанций. Поэтому решение задач синхронизации являются востребованными в настоящее время.

Одним из основных направлений совершенствования электроэнергетической отрасли является разработка и создание современных устройств автоматического управления режимами работы электроэнергетической системы в целом и отдельных ее элементов. Согласно Энергетической стратегии России на период до 2030 года, утвержденной распоряжением Правительства Российской Федерации от 13 ноября 2009 г. № 1715-р, к одному из направлений развития относится разработка и освоение эффективных автоматизированных систем, поддерживающих весь цикл создания совершенных технических средств, систем, алгоритмов и программ управления. В качестве одной из подзадач указанной стратегии следует выделить разработку устройства точной автоматической синхронизации. Совершенствование данных устройств способствует снижению продолжительности процедуры синхронизации, а также предотвращению излишнего износа оборудования, вызванного последствиями несинхронного включения [1].

Целью данной работы является разработка общих принципов построения автоматического устройства синхронизации.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Анализ существующих устройств синхронизации.
2. Определение основных требований, предъявляемых к устройству синхронизации.
3. Разработка алгоритма работы автоматического устройства синхронизации.
4. Моделирование устройства синхронизации в ПК MATLAB.

Глава 1. Предметная область и задачи исследования

1.1 Проблемы эксплуатации существующих систем автоматической синхронизации подсистем ЭЭС

В нормальном режиме работы связь между автономно работающим энергорайоном и единой энергосистемой отсутствует. В таком режиме нагрузка между генераторами энергорайона распределена равномерно, выполняется баланс активных и реактивных мощностей. Переход энергорайона в новое состояние, например, в аварийный и послеаварийный режимы, может привести к потере устойчивости данного объекта. Такие переходные режимы могут возникнуть вследствие резко-переменной нагрузки или изменении генерирующих мощностей подсистемы. Тогда автономно работающий энергорайон становится дефицитным и возникает необходимость немедленной синхронизации с единой энергосистемой, для поддержания бесперебойного электроснабжения потребителей. Синхронизация способствует предотвращению полного останова электростанции.

Процесс синхронизации энергорайона с крупной энергосистемой можно рассматривать в сравнении с синхронизацией одного генератора, при его включении на параллельную работу с энергосистемой. Однако, следует понимать, что энергорайон ЭС включает помимо генераторов комплексную нагрузку, которая влияет на параметры переходного режима. Согласно ПУЭ [3], один генератор может включаться на параллельную работу двумя способами: самосинхронизации или точной синхронизации, а синхронизация энергорайона с ЭС осуществляется только точной синхронизацией.

При включении генератора на параллельную работу методом точной синхронизации необходимо выполнить ряд условий:

- равенство напряжений синхронизируемых объектов;
- равенство частот синхронизируемых объектов;

- совпадение по фазе векторов напряжения генератора и напряжения сети [4].

На практике, при определенных условиях, устанавливаются допустимые отклонения от требуемых параметров.

При автоматической синхронизации включение генераторов на параллельную работу выполняются исключительно устройствами автоматики. Выбор момента времени подачи команды на включение выключателя при точной синхронизации определяется автоматическим синхронизатором. Он подводит значения частот и модуля напряжения синхронизируемого генератора к соответствующим параметрам сети, выполняет контроль допустимости включения и формирует импульс на включение привода выключателя с опережением момента времени совпадения векторов U_G и U_C при наличии между ними уменьшающегося угла сдвига по фазе (т.е. угла опережения) δ_{on} с таким расчетом, чтобы за время включения выключателя t_{ϵ} векторы U_G и U_C совместились [5].

В настоящее время в эксплуатации для точной автоматической синхронизации подсистем электроэнергетических систем используются синхронизаторы, функционирующие по алгоритму автоматического синхронизатора СА-1. Основными устройствами отечественного производства служат микропроцессорные автоматические синхронизаторы АС-М и Спринт-М [6].

Автоматические синхронизаторы типа АС-МЗ и Спринт-М предназначены для включения в сеть синхронного генератора методом точной автоматической синхронизации. АС-МЗ и Спринт-М используются также для включения линии электропередачи, связывающей несинхронные части энергосистемы.

При синхронизации генераторов синхронизаторы выполняют следующие основные функции:

- регулирование частоты генератора импульсами, воздействующими на уставку АРЧВ, для достижения оптимальной частоты скольжения;
- регулирование напряжения генератора импульсами, воздействующими на уставку АРВ, для уравнивания напряжений генератора и сети с данной точностью;
- формирование импульса включения выключателя с заданным временем опережения при достижении условий точной синхронизации.

Устройства точной синхронизации АС-МЗ и Спринт-М состоят из трех функциональных частей: измерительно-преобразовательной ИПЧ, вычислительной ВЧ, исполнительной ИЧ.

Основная функциональная часть – вычислительная – синхронизатора АС-МЗ реализована на микроконтроллере типа SAB-C167-CR-LM фирмы Siemens, а синхронизатора Спринт-М на микропроцессоре TN80C196KC20.

Вычислительная часть выполняет цифровое измерительное преобразование амплитуд и частот ЭДС генератора и напряжения сети угла сдвига фаз между ними и вычисляет их разности и угол опережения синхронизатора при его подготовке к включению на параллельную работу.

Управление микроконтроллером производится сигналами от измерительно-преобразовательной части ИПЧ, которая выполняет предварительную обработку аналоговых входных сигналов – вторичных ЭДС генератора и напряжения на шинах электростанции с изменяющимися информационными параметрами: амплитудой, частотой и фазой. Исполнительные части синхронизаторов включают комплект электромагнитных реле и логический элемент несинхронного включения генератора при $\delta > \delta_{\max}$ или $\omega_s > \omega_{s\max} = 5 \text{ Гц}$.

Принцип действия синхронизаторов основан на времяимпульсном преобразовании частот ЭДС генератора и напряжения шин электростанции и угла сдвига фаз между ними. Времяимпульсный сигнал преобразуется в двоичный код. Из цифрового сигнала об угле сдвига фаз численным дифференцированием формируются сигналы о частоте скольжения синхронного генератора и ускорения его вращения, необходимые для вычисления угла опережения.

В процесс подготовки генератора для включения на параллельную работу программные регуляторы напряжения и частоты вращения вычисляют длительности времяимпульсных управляющих воздействий на элементы изменения уставок автоматических регуляторов возбуждения и частоты вращения генератора.

Согласно техническим характеристикам, синхронизатор АС-МЗ имеет следующие диапазоны уставок:

- время опережения включения T_{on} в пределах (0-1,0) с;
- максимальная частота скольжения Δf_{max} при которой разрешена выдача сигнала на включение выключателя с T_{on} в пределах (0,05-0,5) Гц;
- допустимая зона рассогласования δU напряжений системы U_c и генератора U_g , составляет (0,5-10)% от U_n .

А синхронизатор СПРИНТ-М-следующие диапазоны уставок:

- время опережения включения T_{on} в пределах (0,05-1) с;
- максимальная частота скольжения Δf_{max} , при которой разрешена выдача сигнала на включение выключателя с T_{on} , в пределах (0,1 - 0,8) Гц;
- допустимая зона рассогласования δU напряжений системы U_c и генератора U_g , составляет (1-20)% от U_n .

После установления частоты и допустимой разности напряжения генератора и сети в допустимых пределах синхронизатор переходит к

программе вычисления угла опережения и при удовлетворении условий точной синхронизации формирует импульсное управляющее воздействие на включение выключателя.

Хотя возможности и характеристики рассмотренных современных синхронизаторов удовлетворяют требованиям эксплуатации, следует признать элементную базу и алгоритмические схемы этих систем морально устаревшими. В синхронизаторах отсутствует формализованная процедура перевода участвующих в синхронизации параметров состояния к необходимым для точной синхронизации значениям.

Основной недостаток существующих устройств синхронизации заключается в длительности реализации способа точной синхронизации из-за необходимости подгонки частоты (допустимое скольжение 0,005-0,2 Гц), а также ожидания совпадения фаз на этой частоте. Так согласно руководству по эксплуатации синхронизатора СПРИНТ-М максимальное время задается в диапазоне от 1 до 30 минут с дискретностью 1 минута. В недостаток следует отнести и необходимость расчета угла и времени опережения.

1.2 Современные способы и устройства автоматической синхронизации подсистем ЭЭС

В рассмотренных выше устройствах точной автоматической синхронизации формирование команды на включение генератора в сеть производится после уравнивания частоты и напряжения синхронизируемого генератора и сети. Управление параметрами генератора осуществляют регуляторы частоты вращения турбины АРЧВ и автоматические регуляторы возбуждения синхронного генератора. Основными задачами совершенствования существующих синхронизаторов является повышение скорости и точности синхронизации. Одним из решений данных задач может быть применение новых быстродействующих устройств, осуществляющих измерение и контроль параметров сети, передачу управляющих сигналов на

генератор. Также в качестве устройств, позволяющих повысить скорость и точность синхронизации могут быть рассмотрены FACTS устройства, позволяющие управлять режимными параметрами.

1.2.1 Устройства телемеханики, телеизмерения

В настоящее время развитие устройств автоматизированных систем управления идет быстрым темпом: микропроцессорные устройства пришли на смену электромеханическим, появились программируемые контроллеры, быстродействующие точные реле, цифровые измерительные устройства, волоконно-оптические линии связи. Так же принят международный стандарт МЭК 60870-5-104, регламентирующий протоколы цифрового обмена данными между микропроцессорными устройствами контроля и управления.

Специфическими особенностями автоматизированных систем управления технологическим процессом являются:

- удалённость объектов контроля и управления;
- необходимость высокой точности передачи измеряемых величин;
- недопустимость большого запаздывания сигналов;
- высокая надёжность передачи команд управления;
- высокая степень автоматизации процессов сбора информации.

Все это создает предпосылки для построения новых каналов связи.

Волоконно-оптические линии связи (ВОЛС) — линии связи, в которых физической средой передачи сигналов является оптическое волокно. ВОЛС являются базовой сетью единой технологической сети связи электроэнергетики. Создание сети осуществляется подвеской на ВЛ оптического кабеля, встроенного в грозозащитный трос или самонесущего кабеля, и организацией систем передачи с использованием технологий плезиохронной цифровой иерархии ПЦИ (PDH), синхронной цифровой иерархии СЦИ (SDH).

Технология построения ВОЛС с использованием ВЛ оптимальна для электроэнергетики, так как магистральные участки электрической сети и телекоммуникационных сетей могут сооружаться как единое целое.

Передача информации по ВОЛС имеет целый ряд достоинств перед передачей по другим сетями связи. Одно из наиболее важных преимуществ оптического волокна над медной или любой другой средой передачи информации является большая пропускная способность, позволяющая передавать информацию на высокой скорости. ВОЛС не подвержена внешним электромагнитным влияниям, поскольку волокно изготовлено из диэлектрического материала. Из-за отсутствия искрообразования оптическое волокно повышает безопасность сети на химических, нефтеперерабатывающих предприятиях, при обслуживании технологических процессов повышенного риска.

Волоконно-оптические линии имеют малое затухание сигнала, по сравнению с проводными системами связи, поэтому позволяют передавать информацию на значительно большее расстояния без усилителей.

Чтобы передать данные через оптические каналы, сигналы должны быть преобразованы из электрического вида в оптический. На рисунке 1 представлена структурно-функциональная схема передачи управляющего сигнала по ВОЛС от трансформаторов напряжения установленных на ВЛ до систем автоматического регулирования возбуждения и автоматического регулирования частоты вращения генератора.



Рисунок 1 – Структурно-функциональная схема передачи управляющего сигнала по ВОЛС

Измерение параметров электрической сети с высокой точностью и быстродействием, а также преобразование информации в цифровой код обеспечивают multifunctional измерительные преобразователи (МИП).

За период измерения устройство вычисляет более 30 параметров трехфазной электрической сети (частота напряжения, действующее значение напряжения, сила тока по каждой фазе и др.) Эти данные в виде телеизмерений передаются на промежуточный контроллер присоединения через последовательный интерфейс.

Сигнал с выхода контроллера поступает на вход оптического мультиплексора. Мультиплексор – это устройство, позволяющее передавать по одному каналу передачи одновременно несколько различных потоков данных.

С выхода мультиплексора сигнал поступает в промежуточный контроллер присоединения. Контроллер выдает сигналы на измерительные приборы, а также преобразуя их, передает на контроллер регулирования. Контроллер регулирования осуществляет управление технологическим объектом посредством подачи сигналов телеуправления на исполнительные механизмы.

Рассмотренная структурно-функциональная схема передачи сигнала по ВОЛС, выполненная на основе современного оборудования, позволяет обеспечить удаленное управление объектом с высокой точностью и скоростью передачи сигналов.

1.3 Задачи разработки и реализации современных систем автоматической синхронизации подсистем

Существующие схемы устройств автоматической синхронизации построены на принципе регулирования частот синхронизируемых объектов в сторону их сближения и ожидания момента времени при котором угол разности фаз между векторами напряжений этих объектов попадет в допустимый

диапазон, после чего подается команда на включение на параллельную работу. Данный принцип является очень «грубым» и в полной мере не отвечает таким требованиям, как быстродействие и точность управления.

Высокая точность соответствия параметров синхронизируемых частей необходима для обеспечения приемлемого качества последующих за включением синхронизирующего выключателя переходных процессов. Малая длительность синхронизации повышает оперативность управления режимами энергосистем. Поэтому основными задачами разработки современных систем автоматической синхронизации подсистем ЭЭС является повышение скорости и точности синхронизации.

Эти задачи постепенно решаются с развитием научно-технического прогресса, промышленным выпуском новых устройств. Так осуществился переход устройств автоматической синхронизации выполненных на базе электромеханических реле к микропроцессорным. В настоящее время идет переход от аналоговых к цифровым системам синхронизации. Одним из наиболее принципиальных различий между аналоговым и цифровым сигналом является иммунитет к шумам. Цифровой сигнал в электронной форме также подвержен воздействию шума, как и аналоговый. Но цифровые сигналы могут иметь только два значения: ноль и единицу. Шум будет воздействовать на сигнал только в том случае, если его величина достигнет уровней, которые могут превзойти помехоустойчивость цифровых схем, определяющих равенство сигнала нулю или единице. Это означает, что цифровые сигналы допускают аккумуляцию шума до более высокого уровня по сравнению с аналоговыми видеосигналами, поэтому мы считаем, что цифровые сигналы фактически имеют иммунитет к шумам. В конечном счете это дает увеличение расстояния передачи, высокую помехозащищенность и отсутствие искажений сигнала.

Рост скорости передачи информации о параметрах синхронизируемых частей электроэнергетических систем связан с построением каналов связи по ВОЛС. Высокая пропускная способность оптического волокна позволяет передавать информацию на высокой скорости, недостижимой для других систем связи.

Повышение эффективности систем синхронизации может быть достигнуто в результате использования современных микропроцессорных цифровых устройств, благодаря высокой точности измерений, быстродействию передачи управляющего сигнала в реальном времени.

Одним из перспективных принципов автоматического управления, который может быть положен в основу новых устройств синхронизации подсистем является принцип управления по программным траекториям движения технических объектов. Суть этого принципа заключается в разделении задачи синтеза систем управления на подзадачу построения программных (желаемых) траекторий движения объектов и подзадачу формирования обеспечивающих эти траектории управлений.

1.4 Заключение по главе 1

Существующие схемы синхронизации построены на принципе регулирования частот синхронизируемых объектов в сторону их сближения и ожидания момента времени, при котором угол разности фаз между векторами напряжений этих объектов попадет в допустимый диапазон, после чего подается команда на включение в «параллель». Данный принцип является очень «грубым» и в полной мере не отвечает таким требованиям, как быстродействие и точность управления. Поэтому в настоящее время стоит задача совершенствования схем, принципов синхронизации. Производство и внедрение современных микропроцессорных устройств позволяют повысить

быстродействие, точность передачи управляющего сигнала на большие расстояния.

Также перспективным направлением является реализация принципа управления по программным траекториям движения для задач синхронизации подсистем.

Глава 2. Теоретические основы построения систем автоматической синхронизации подсистем ЭЭС на основе принципа управления по программным траекториям движения технических объектов

2.1 Основы общей теории управления движения технических объектов

В любой системе автоматического управления выделяют управляемый объект и систему управления (СУ). Назначение системы управления – выработка закона управления, воздействующего на объект с целью обеспечения требуемых свойств управляемого процесса. В общей теории автоматического управления различают программное управление (управление по разомкнутому контуру) и управление с обратной связью (управление по замкнутому контуру). При программном управлении дополнительная информация, которая поступает в процессе управления, не используется для коррекции движения, то есть движение управляемого объекта осуществляется по жесткой, заранее составленной программе. В отличие от этого, при управлении по замкнутому контуру используется обратная связь по текущим состояниям управляемого объекта. Преимущество такого управления заключается в том, что процесс управления становится самокорректирующимся или даже (при наличии адаптации) самонастраивающимся. Коррекция движения по сигналам обратной связи позволяет уменьшить влияние постоянно действующих параметрических возмущений. Современный подход к решению задач управления базируется на принципе адаптации систем управления к заранее неизвестным свойствам управляемого объекта и условиям его функционирования. В ходе работы адаптивной СУ происходит её приспособление к фактическим условиям и свойствам объекта, которое проявляется в перестройке параметров или структуры СУ в таком направлении, чтобы она к моменту завершения переходного процесса адаптации гарантировала достижения цели управления [10].

Таким образом, система управления называется адаптивной, если она обеспечивает за конечное время достижения цели управления для любых управляемых объектов и условий их функционирования.

Расчет программной траектории движения, управлений и управляющих воздействий (УВ), в целом базируется на общих принципах и математических основах построения адаптивных системах управления программной траекторией движения (СУПД) управляемых объектов.

Состояние управляемого объекта во времени определяется системой дифференциальных уравнений:

$$\dot{x}(t) = F[x(t), u(t), \theta] + \pi(t); \quad x(t_0) = x_0; \quad t \in [t_0, t_T] \quad (2.1)$$

где $u(t)$ – m -мерная вектор-функция, называемая управлением;

θ – m -мерный вектор параметров;

$\pi(t)$ – m -мерная функция внешних возмущений;

x_0 – начальное состояние;

$T = t_T - t_0$ – конечное или бесконечное время движения.

Целью управления является осуществление движения объекта (2.1) по заданной программе. Программная траектория движения представляет собой желаемый закон изменения во времени состояний объекта, обладающий заранее предписанным свойством. Если этот закон является решением системы уравнений (2.1) при некотором допустимом управлении, то его также можно назвать программной траекторией движения, представляемой вектор-функцией $x_p(t)$, $t \in [t_0, t_T]$. При этом допустимое управление $u_p(t)$, порождающее ПТД $x_p(t)$, называют программным управлением.

Таким образом, ПТД – это некоторое целенаправленное движение объекта (2.1), которое может быть осуществлено выбором подходящего (программного) управления (при известных θ и $\pi(t)$).

При неизвестных θ и $\pi(t)$ программное управление $u_p(t)$ не обеспечит точное движение по заданной ПТД $x_p(t)$ и может вообще увести объект в сторону от ПТД. В подобных случаях управление должно формироваться с учетом дополнительной информации, поступающей в СУ в процессе движения объекта. Этому требованию отвечает управление с обратной связью, при котором в каждый момент времени t определяется управление $u[t, x(t)]$, на основании информации о текущем состоянии $x(t)$ объекта (2.1).

2.2 Основы построения программных траекторий движения генераторов и подсистем электроэнергетических систем

Построение программных траекторий движений является первым этапом проектирования систем управления программным движением. Под термином траектория движения электроэнергетической системы в переходном режиме в общепринятом смысле понимают совокупность зависимостей параметров режима от времени, которая в математическом представлении трактуется как траектория движения изображающей точки в многомерном вещественном пространстве. Координатами этой точки являются независимая переменная (время) и фазовые переменные (параметры режима), определяющие состояния энергосистемы в рассматриваемые моменты времени.

Помимо траекторий движения энергосистемы в целом далее рассматриваются траектории движения входящих в ее состав одного или нескольких синхронных генераторов. Математически такие траектории выражаются в форме подгрупп фазовых координат, изменяющихся во времени. Подмножество этих координат $x_y(t)$ рассматривается как подмножество

управляемых параметров, для которого производится построение ПТД $x_p(t)$, используемых для расчета (или аппаратной реализации) противоаварийных управлений $u(t)$ [2].

Все множество $x(t)$ параметров режима, отражающих движение ЭЭС, содержит подмножества управляемых $x_y(t)$ и неуправляемых $x_c(t)$ параметров. Принимая, что $x_y(t)$ отражает движение управляемого объекта, для которого строится ПТД, неуправляемую часть $x_c(t)$ можно рассматривать как параметрическое описание динамической среды, в которой управляется объект. При этом управление $u(t)$, активно воздействуя на движение управляемого объекта, пассивно (то есть через управляемый объект) воздействует на среду. Соответственно, и объект, через ПТД, и среда, через взаимосвязи с объектом и управляющим устройством (УУ), формируют управление $u(t)$.

Результатами построения ПТД являются табличные или аналитические зависимости $x_p(t)$, приводящие управляемые координаты к конечным условиям. При формировании этих зависимостей заданным необходимо учитывать специфику среды с тем, чтобы неуправляемые машины (генераторы, двигатели) теряли устойчивость не во время динамического перехода ЭЭС. Эти условия могут быть учтены в виде некоторых ограничений на ПТД.

Задача формирования ПТД, при выполнении перечисленных условий, сводится к поиску допустимого пути перевода точки, изображающей управляемый объект, из положения с координатами начала управления $x_{y1} = x_y(t_1)$ в конечное положение $x_{yT} = x_y(t_T)$ [2].

Рассмотрим пример построения программной траектории движения управляемого генератора при синхронизации с сетью (рис.2).

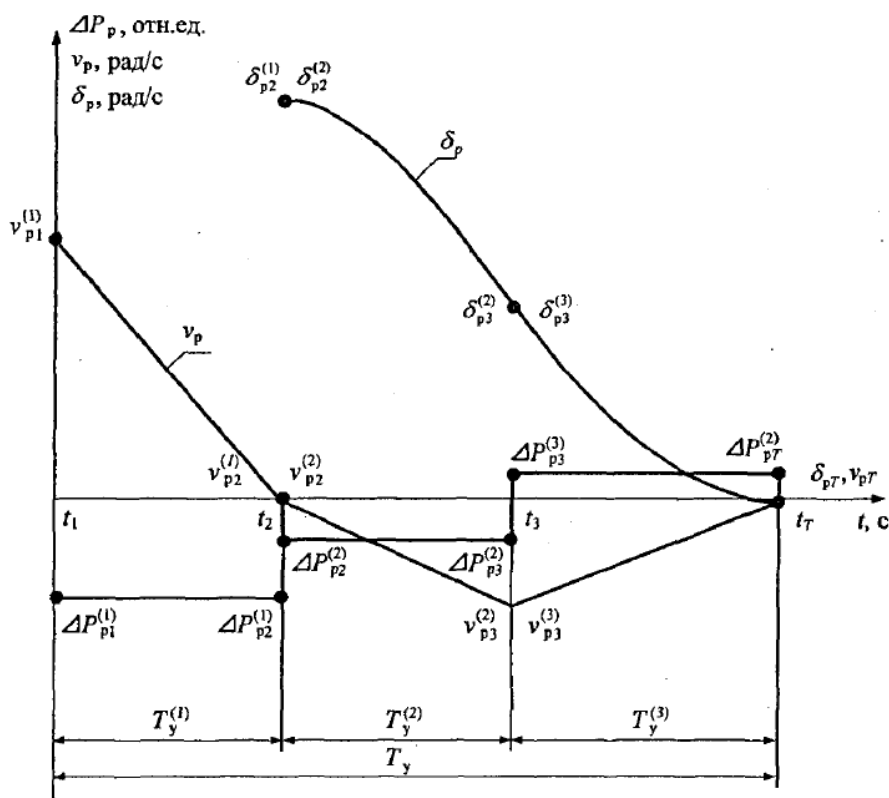


Рисунок 2 – Пример построения ПТД синхронизируемого генератора

На рисунке 2 момент времени t_1 является началом управления, интервал $[t_1; t_T]$ – интервалом управления длительностью $T_y = t_T - t_1$. Суть управления заключается в том, чтобы к концу интервала управления управляемый объект по своей программной траектории подошел к нулевым значениям потенциальной и кинетической энергии относительного движения [8].

В качестве управляемых параметров процесса синхронизации рассматриваются небаланс мощностей на валу $\Delta P_y(t)$, угол вылета $\delta_y(t)$, и относительная скорость $v_y(t)$ ротора произвольно выбранного генератора с постоянной инерции T_j . Связь между этими управляемыми параметрами однозначно определяется через известную подсистему дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \dot{\delta}_y(t) = \nu_y(t); \\ \dot{\nu}_y(t) = \frac{\omega_0}{T_j} \cdot \Delta P_y(t). \end{cases} \quad (2.2)$$

Размерности параметров: t [с], T_j [с], δ_y [рад], ν_y [рад/с], ΔP_y [отн.ед.].

Объектом управления в рассматриваемом случае является изображающая точка $x_y = colon[t, \Delta P_y, \nu_y, \delta_y]$, которой искомым управлением $u(t)$ предписывается перемещение по ПТД $x_p = colon[t, \Delta P_p, \nu_p, \delta_p]$ на подынтервалах управления. Для построения ПТД можно использовать уравнения (2.2), так как $x_p(t)$ – это одна из траекторий движения объекта.

На интервале управления $[t_1, t_T]$ выделяются три подынтервала, на которых при формировании ПТД достигаются различные промежуточные цели (рис. 2.1). На первом подынтервале $[t_1, t_2]$ происходит уменьшение начальной дополнительной кинетической энергии ротора синхронизируемого генератора до нулевого значения. В конце этого подынтервала относительная скорость ротора становится нулевой ($\nu_{p2}^{(1)} = 0$), а относительный угол принимает некоторое произвольное значение $\delta_{p2}^{(1)}$. На втором $[t_2, t_3]$ и третьем $[t_3, t_T]$ подынтервалах осуществляется снижение относительного угла вылета ротора генератора до нулевого значения. При этом управлении $u(t)$ в конце второго подынтервала достигается некоторая (экстремальная) относительная скорость $\nu_{p3}^{(2)} = extr$, которая уменьшается до нуля к концу третьего подынтервала ($\nu_{p4}^{(3)} = 0$), то есть к конечному моменту $t_T = t_4$ всего интервала управления. В этот же момент времени полностью снимается управление: $u(t_T) = \Delta P(t_T) = 0$.

В результате в момент времени t_T интервала управления $[t_1, t_T]$ выполняются граничные значения всех параметров ПТД $x_{pT} = colon[t_T, \Delta P_{pT}, \nu_{pT}, \delta_{pT}] = colon[t_T, 0, 0, 0]$ удовлетворяющее условиям

подключения генератора к электрической сети без дополнительных кинетической и потенциальной энергий.

Если, при заданных конечных значениях параметров ПТД, аналитически решить подсистему уравнений, то можно получить расчетные формулы для определения граничных и текущих значений параметров ПТД $\Delta P_y(t)$, $\nu_y(t)$, $\delta_y(t)$ (табл. 1).

Таблица 1 – Расчетные формулы для определения параметров ПТД генератора

№	Определение подынтервалов управления и небалансов мощностей	Определение текущих и конечных значений угла на подынтервалах	Определение текущих и конечных значений относительной скорости на подынтервалах
1	<p>Задано $T_y^{(1)}$, t_1;</p> <p>Вычисляются: $t_2 = t_1 + T_y^{(1)}$</p> $\Delta P_{p1}^{(1)} = -\frac{T_j \cdot \nu_{p1}^{(1)}}{\omega_0 \cdot T_y^{(1)}}$	<p>Текущие значения угла на первом подынтервале управления не вычисляются. В конце первого подынтервала управления измеряется реальное значение угла $\delta_2^{(1)}$</p>	$\nu_p = \nu_{p1}^{(1)} + K \Delta P_{p1}^{(1)} (t - t_1)$ $\nu_{p2}^{(2)} = \nu_{p1}^{(1)} + K \Delta P_{p1}^{(1)} T_y^{(1)}$
2	<p>Задано $T_y^{(2)}$;</p> <p>Вычисляются: $t_3 = t_2 + T_y^{(2)}$</p> $\Delta P_{p2}^{(2)} = \frac{\delta_{pT} - \delta_{p2}^{(2)}}{0,5 K T_y^{(2)} (T_y - T_y^{(1)})}$	$\delta_p = \delta_{p2}^{(2)} + \nu_{p2}^{(2)} (t - t_2) + 0,5 K \Delta P_{p2}^{(2)} (t - t_2)^2$ $\delta_{p3}^{(3)} = \delta_{p2}^{(2)} + \nu_{p2}^{(2)} T_y^{(2)} + 0,5 K \Delta P_{p2}^{(2)} T_y^{(2)2}$	$\nu_p = \nu_{p2}^{(2)} + K \Delta P_{p2}^{(2)} (t - t_2)$ $\nu_{p3}^{(3)} = \nu_{p2}^{(2)} + K \Delta P_{p2}^{(2)} T_y^{(2)}$
3	<p>Вычисляются:</p> $T_y^{(3)} = T_y - T_y^{(1)} - T_y^{(2)}$ $\Delta P_{p3}^{(3)} = -\frac{\Delta P_{p2}^{(2)} \cdot T_y^{(2)}}{T_y^{(3)}}$	$\delta_p = \delta_{p3}^{(3)} + \nu_{p3}^{(3)} (t - t_3) + 0,5 K \Delta P_{p3}^{(3)} (t - t_3)^2$ $\delta_{pT}^{(3)} = \delta_{p3}^{(3)} + \nu_{p3}^{(3)} T_y^{(3)} + 0,5 K \Delta P_{p3}^{(3)} T_y^{(3)}$	$\nu_p = \nu_{p3}^{(3)} + K \Delta P_{p3}^{(3)} (t - t_3)$ $\nu_{pT} = \nu_{p3}^{(3)} + K \Delta P_{p3}^{(3)} T_y^{(3)}$

Обозначения: $K = \frac{\omega_0}{T_j}$ (рад/с²), ω_0 (рад/с²) – синхронная частота, T_j (с)

– постоянная инерции ротора генератора, t_1, t_2, t_3, t_4 (с) – граничные моменты

времени подынтервалов управления, $T_y^{(i)}(с)$, $i = \overline{1,3}$ – промежутки времени подынтервалов управления, ΔP_{01} (отн.ед.) – небаланс мощностей на интервале возмущения; $\Delta P_{pi}^{(i)}, \Delta P_{pi+1}^{(i)}$ (отн.ед.) $i = 1,3$ – небалансы мощностей в граничные моменты времени подынтервалов управления, $v_p^i(t), v_{pi}^i, v_{pi+1}^i, \delta_p^i(t), \delta_{pi}^i, \delta_{pi+1}^i, i = 1,3$ – текущие и граничные значения относительной скорости и угла на подынтервалах управления.

Простота расчетных формул позволяет быстро доопределить граничные значения параметров ПТД на подынтервалах управления и с их использованием вычислить желаемые значения угла и относительной скорости ротора генератора.

2.3 Расчет управлений при автоматической синхронизации подсистем электроэнергетических систем

Перед началом построения систем адаптивной синхронизации подсистем ЭЭС определяются электростанции, генераторы которых далее рассматриваются в качестве управляемых объектов ЭЭС. По результатам расчетов установившихся режимов и управляемых динамических переходов ЭЭС определяются начальное и конечное состояния ЭЭС, оценивается вид траекторий движения $x_y = colon[t, \Delta P_y, v_y, \delta_y]$ управляемых генераторов и подбираются согласующиеся с этими траекториями ПТД $x_p = colon[t, \Delta P_p, v_p, \delta_p]$. Количественные показатели параметров ПТД определяются при расчетах управлений [2].

Расчет управлений на основе ПТД включает пять основных этапов.

Первый этап – расчет возмущенного движения ЭЭС до момента приложения управления обусловлен наличием технических причин задержки ввода в действие УУ. За это время управляемые параметры изменяются от

исходных значений $x_{y0} = x_y(t_0)$, измеренных в начальный момент переходного режима, до величин $x_{y1} = x_y(t_1)$, соответствующих начальному моменту процесса управления. Численное интегрирование уравнений возмущенного движения на этой стадии может быть проведено по любому из известных алгоритмов.

На *втором этапе* формируются ПТД $x_p(t)$ управляемых генераторов с учетом предварительно выявленных динамических свойств ЭЭС и технических характеристик средств управления.

На *третьем этапе* вычисляются кусочно-непрерывные управления $u(t)$, обеспечивающие движение управляемых генераторов по программным траекториям.

При использовании средств управления неплавного (ступенчатого, дискретного и др.) действия выполняются вычисления *четвертого этапа* – этапа аппроксимации полученных кусочно-непрерывных управлений в соответствии с типом применяемых УУ.

На последнем – *пятом этапе* проводится контрольный расчет переходного режима ЭЭС с использованием сформированных управлений. Для плавных управлений, полученных на третьем этапе, контрольный расчет не требуется, так как эти управления определяются в ходе численного интегрирования уравнений переходного режима.

Как следует из этого общего описания расчетов, вычисление кусочно-непрерывных управлений $u(t)$ осуществляется на третьем этапе в ходе численного решения уравнений движения ЭЭС, в которых параметры $x_y = colon[t, \Delta P_y, \nu_y, \delta_y]$ изменяются по предписанным программным траекториям движения $x_p = colon[t, \Delta P_p, \nu_p, \delta_p]$. Этим определяется

необходимость модификации традиционно применяемых алгоритмов численного интегрирования уравнений движения ЭЭС [2].

Далее рассмотрим второй способ управления ЭЭС, в котором используются реактивное управляющее устройство поперечного включения. Текущие режимные состояния таких УУ на интервале управления полностью определяются значениями их активных и реактивных мощностей $P_{ui}(t), Q_{ui}(t), i = \bar{1}, \bar{l}$ также значениями углов $\delta_{ui}(t)$ и напряжений $U_{ui}(t), i = \bar{1}, \bar{l}$, соответствующих (управляющих) узлов. Множество этих параметров обозначается как управление $u = colon[P_u, Q_u, U_u, \delta_u]$, с помощью которого достигается движение управляемых генераторов по сформированным на втором этапе расчета программным траекториям.

Компоненты $P_u(t), Q_u(t), U_u(t), \delta_u(t)$ управления $u(t)$ являются l -мерными вектор-функциями управляющих параметров, где l – количество управляющих узлов. Вектор-функции проводимостей $b_u(t), g_u(t)$ или сопротивлений $r_u(t), x_u(t)$, определяемых для УУ по известным формулам через компоненты вектор-функций $P_u(t), Q_u(t), U_u(t), \delta_u(t)$, также рассматриваются в качестве вектор-функций управляющих параметров.

Рассмотрим случай, когда ПТД формируется для одного генератора и управление $x_{u1} = E'_{u1}$ вычисляется для одного УУ ЭЭС ($l=1$).

Тогда система:

$$\psi_1(x_{ui}) = 0, i = \bar{1}, \bar{l} \quad (2.3)$$

в явном виде пишется как

$$\psi_1 = H_1(x_{u1}^2 + A_b^2 - 2A_b B_g x_{u1} + B_g^2 x_{u1}^2) + C'_1 x_{u1} + C''_1 (A_b - B_g x_{u1}) = 0, \quad (2.4)$$

где $H_1 = b_{1+n,1+n} - g_{1+n,1+n} \operatorname{tg} \varphi_{u1}$, $A_b = J''^{-1} A$, $B_g = J''^{-1} J'$,

$$C'_1 = tg \varphi_{ui} (\sum_{j=1}^n I'_{1+n,j} + \sum_{j=n_l+1}^m I'_{1+n,j}) + (\sum_{j=1}^n I''_{1+n,j} + \sum_{j=n_l+1}^m I''_{1+n,j}),$$

$$C''_1 = tg \varphi_{ui} (\sum_{j=1}^n I''_{1+n,j} + \sum_{j=n_l+1}^m I''_{1+n,j}) + (\sum_{j=1}^n I'_{1+n,j} + \sum_{j=n_l+1}^m I'_{1+n,j})$$

При этом A , J' , J'' – квадратные матрицы, а C'_1 , C''_1 – вектора-функции.

Обозначив

$$a = H_1(1 + B_g^2), \quad (2.5)$$

$$b = C'_1 - 2H_1 A_b B_g - C''_1 B_g, \quad (2.6)$$

$$c = H_1 A_b^2 + C''_1 A_b, \quad (2.7)$$

преобразуем квадратное уравнение (2.4) к стандартной форме

$$\psi_1 = ax_{u1}^2 + bx_{u1} + c = 0, \quad (2.8)$$

для которой аналитическое решение известно.

В случаях, когда $\det J'' \leq \varepsilon$, следует перейти к расчетам по уравнению

$$x_u = A'_b - B'_g y_u \quad (2.9)$$

Подставив (2.9) в выражение (2.4), после преобразований получим в явном виде квадратное уравнение для проведения расчетов:

$$\psi'_1 = a'y_{u1}^2 + b'y_{u1} + c' = 0, \quad (2.10)$$

где

$$a' = H_1(1 + B_g'^2), \quad (2.11)$$

$$b' = C''_1 - 2H_1 A'_b B'_g - C'_1 B'_g, \quad (2.12)$$

$$c' = H_1 A_b'^2 + C''_1 A'_b. \quad (2.13)$$

При этом $A'_b = J'^{-1}A$, $B'_g = J''^{-1}W''$.

Уравнения (2.4, 2.10) позволяют вычислять управления в виде функций $E_u(t)$ в узлах подключения управляющих устройств на основе итерационных и аналитических расчетов.

В одномашинной ЭЭС наиболее просто вычисляются параметры УУ по ПТД. В этом частном случае не требуется численное решение дифференциальных уравнений и отсутствует необходимость в итерационном расчете управлений, что облегчает проведение исследовательских расчетов [2].

2.4 Применение принципа адаптивности для решения задач автоматической синхронизации подсистем ЭЭС

Целью управления объектом является осуществление его движения по желаемому (заданному) закону изменения параметров, которому соответствует заданная траектория. Современный подход к решению подобных задач основан на принципе адаптации СУ к заранее неизвестным свойствам конкретного объекта и условиям его функционирования. Если СУ адаптивна, то процесс управления объектом является самокорректирующимся. Коррекция движения в этом случае осуществляется по каналам обратной связи, что позволяет значительно снизить влияние возмущений [9].

В ходе работы адаптивной СУ происходит ее приспособление к фактическим условиям и свойствам объекта, которое проявляется в перестройке параметров или структуры СУ в таком направлении, чтобы она к моменту завершения переходного процесса адаптации обеспечила достижение цели управления [9].

Одним из вариантов адаптивных систем управления является система с эталонной моделью. Для решения задачи синхронизации подсистем по программным траекториям движения в качестве эталонной модели применяется сама ПТД. В качестве цели управления принимаются условия точной

синхронизации, а в качестве алгоритмов управления – алгоритмы синхронизации по ПТД.

2.5 Заключение по главе 2

Основная задача формирования ПТД при синхронизации подсистемы состоит в переводе ротора генератора в конечное состояние (к моменту включения на параллельную работу с ЭЭС) с нулевыми значениями кинетической и потенциальной энергий относительного движения. Для достижения поставленной цели выделяют три подынтервала управления, на каждом из которых достигаются промежуточные конечные цели.

Глава 3. Общие принципы построения многофункционального устройства синхронизации

При моделировании устройства синхронизации необходимо придерживаться определенных принципов построения:

1. Оснащение современным оборудованием – электронными измерительными трансформаторами с цифровыми выходами, выключателями, оснащенными контроллерами управления и др.

2. Применение коммуникационных каналов связи, которые должны осуществлять и передавать следующие виды информации:

- информация о состоянии схемы и параметрах режима энергосистемы;
- информация о возникших возмущениях.

Каналы связи, в свою очередь, должны обеспечивать:

- надежность и достоверность передачи информации, настроек и статуса устройств между взаимодействующими комплексами путем тестирования с использованием соответствующих протоколов передачи;
- требуемую скорость передачи информации.

3. Необходимо использовать современные цифровые технологии преобразования, передачи и обработки информации. Так, с помощью волоконно-оптических линий связи можно объединять локальные сети в одну общую, тем самым значительно сокращая число связей.

4. Устройство синхронизации должно включать в себя все необходимые функции, позволяющие осуществлять эффективное включение на параллельную работу.

5. Все функциональные блоки должны размещаться в одном шкафу.

3.1 Алгоритм работы автоматического устройства синхронизации

На рисунке 3 представлена схема функциональных связей автоматического устройства синхронизации.

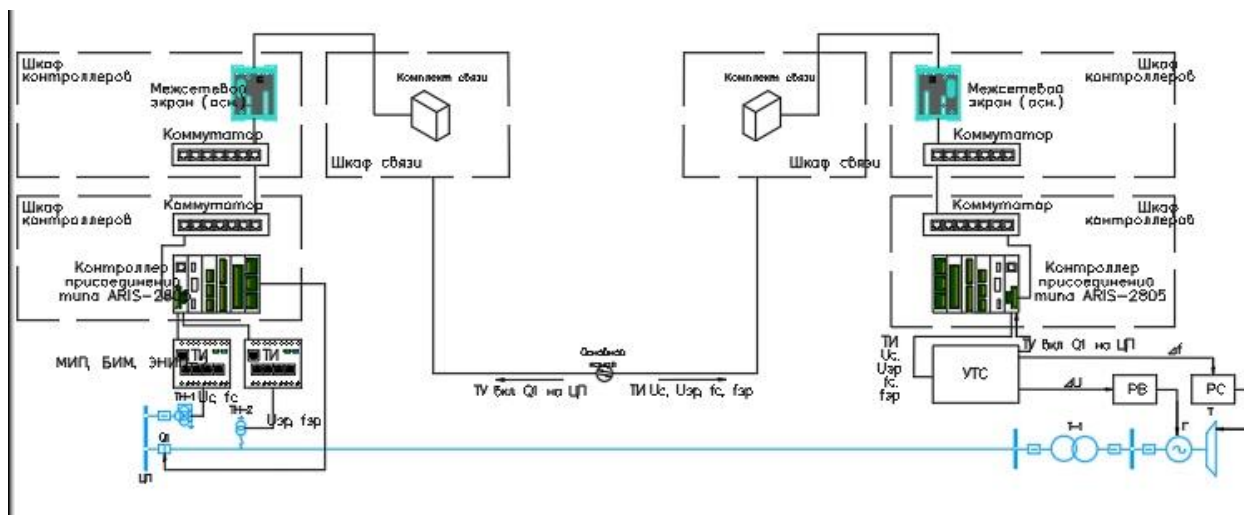


Рисунок 3 – Схема функциональных связей автоматического устройства синхронизации

Точка синхронизации находится на шинах центра питания (выключатель Q1). Подгонка параметров, для осуществления синхронизации, происходит при помощи устройства точной синхронизации (УТС), которое установлено на генераторе в энергорайоне. Рассмотрим более подробно процесс синхронизации. С помощью устройств телеизмерений, таких как МИП, БИМ, ЭНИП 2, происходит измерение параметров электрической сети с высокой точностью и быстродействием. Измерительные входы устройства подключаются непосредственно к трансформаторам напряжения как со стороны центра питания, так и со стороны энергорайона.

Рассмотрим основные функции и возможности многофункциональных измерительных преобразователей на примере МИП. Многофункциональные измерительные преобразователи осуществляют измерение и вычисление электрических параметров трехфазной сети.

Основными преимуществами МИП являются:

- высокое быстродействие (минимальный цикл измерения всех параметров составляет 20 мс);
- простота конфигурации по сети Ethernet;
- возможность подключения двух и более устройств по протоколу МЭК 60870-5-104;
- наличие аналоговых входов для измерения нормированных сигналов тока и напряжения.

Устройство способно вычислить более 30 параметров трехфазной электрической сети (частота напряжения, действующее значение напряжения, коэффициент мощности, активная, реактивная и полная мощности и др.) и преобразовать их в цифровой сигнал. С выходов устройства телеизмерения цифровые сигналы попадают в контроллер присоединения, который может быть выполнен на базе ARIS-2808. Контроллеры способны осуществлять сбор и обработку информации с большого количества многофункциональных измерительных приборов.

Рассмотрим основные функции контроллера, который выполнен на базе ARIS-2808:

- сбор дискретных и аналоговых сигналов;
- формирование команд управления коммутационными аппаратами;
- формирование дискретных выходных сигналов для цепей блокировки и сигнализации;

Основные протоколы обмена информацией, поддерживаемые контроллером ARIS-2808: МЭК 60870-5-104, МЭК 60870-5-103, МЭК 60870-5-101.

Сигнал с выхода контроллера поступает через коммутатор на межсетевой экран, который реализует защиту от несанкционированного

доступа. Далее сигнал поступает в шкаф связи, в котором происходит модуляция цифрового сигнала в световой поток. Данное преобразование осуществляется за счет оптического мультиплексора. Мультиплексор – это устройство, позволяющее передавать по одному каналу передачи одновременно несколько различных потоков данных. Мультиплексор обеспечивает передачу данных по волоконно-оптической линии связи (ВОЛС) на электростанцию. Далее осуществляется обратная процедура перехода сигнала, таким образом, измеренные напряжение и частота через контроллер присоединения поступают на измерительные входы УТС. УТС определяет отклонения параметров от допустимых значений и выдает команду на работу АРВ (регулирование тока возбуждения, тем самым изменение напряжения) и (или) АРЧВ (регулирование подачи пара на лопасти турбины, тем самым изменение частоты), если отклонения параметров больше установленных. Таким образом, когда все условия соблюдены, УТС подает сигнал на включение выключателя Q1.

На рисунке 4 представлен алгоритм работы автоматического устройства синхронизации, который описан выше.

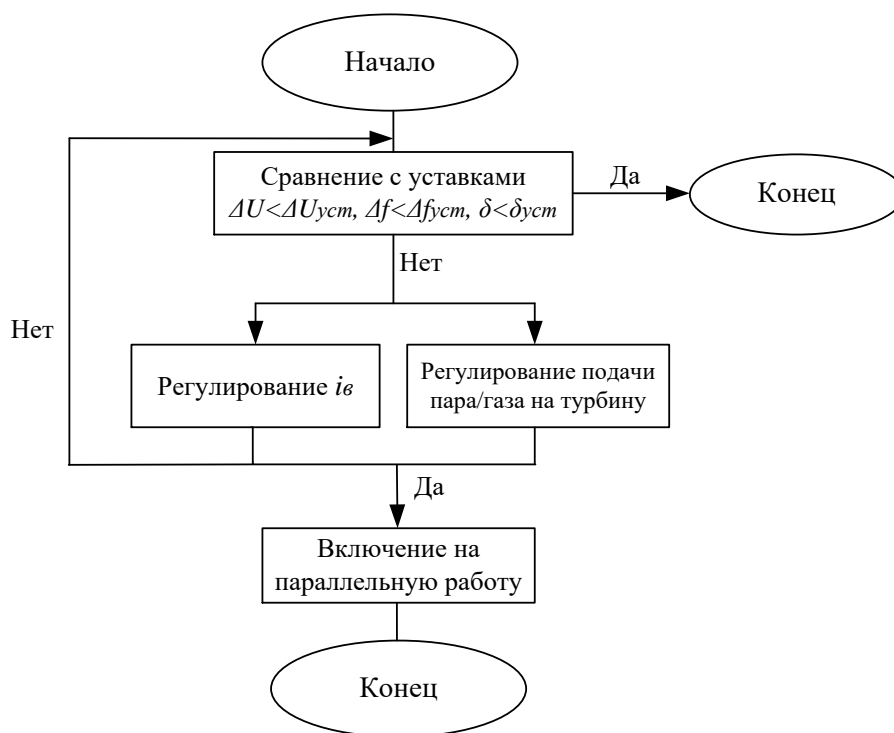


Рисунок 4 – Алгоритм работы автоматического устройства синхронизации

Синхронизация считается успешной при следующих отклонениях:

- частота скольжения f_s 0,05 – 0,2 Гц;
- разность напряжений синхронизируемых объектов около 5 – 10%;
- угол между векторами напряжений, синхронизируемых объектов, ± 30 градусов.

3.2 Структурно-функциональная схема многофункционального устройства синхронизации

На рисунке 5 изображена структурно-функциональная схема автоматического устройства синхронизации.

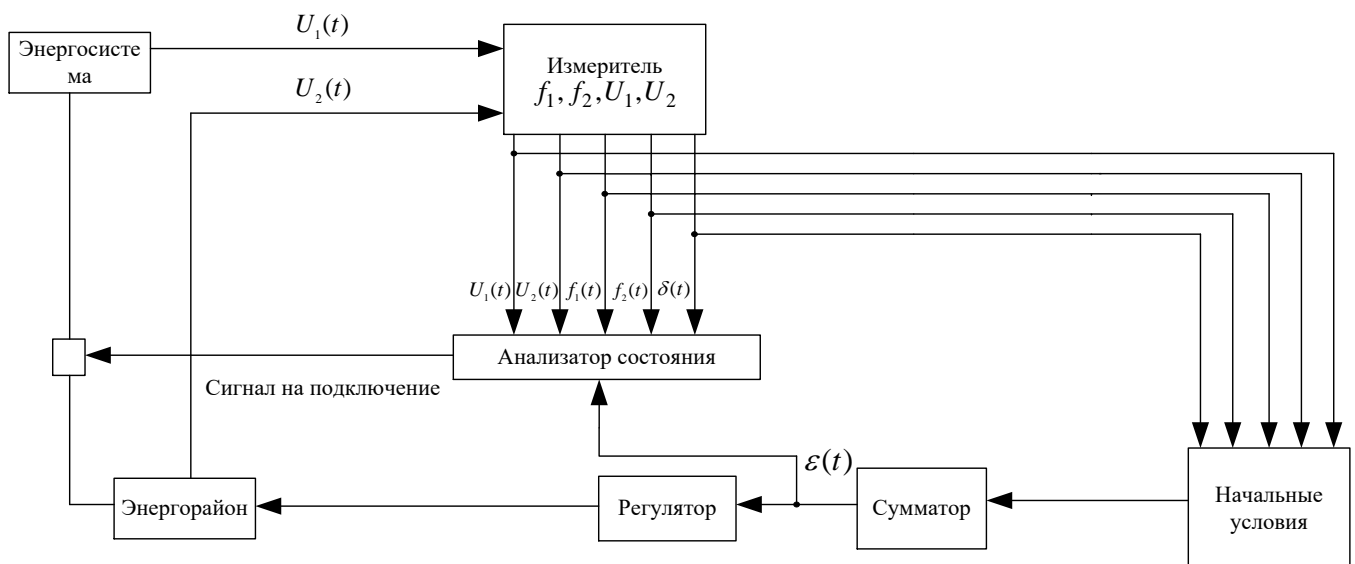


Рисунок 5 – Структурно-функциональная схема автоматического устройства синхронизации

Устройство работает следующим образом. Сигналы напряжения $U_1(t)$ и $U_2(t)$, пропорциональные напряжениям энергосистемы и энергорайона, соответственно, поступают на вход измерителя, на выходе которого формируются сигналы, пропорциональные модулям и частотам напряжений, а также сигнал, пропорциональный углу разности фаз между векторами $U_1(t)$ и

$U_2(t)$. Далее эти сигналы поступают на вход анализатора состояния, который отслеживает выполнение условий точной синхронизации.

Оценка параметров осуществляется в сумматоре, посредством которого вычисляется ошибка $\varepsilon(t)$ регулирования, которая поступает на вход регулятора, который, в свою очередь, вырабатывает управляющий сигнал на изменение режимных параметров. В анализаторе состояния определяется момент времени, когда величина отклонения $\varepsilon(t) \approx 0$, т.е. соблюдаются все условия точной синхронизации, после чего подается сигнал на включение выключателя, соединяющего синхронизируемые объекты.

3.3 Аппаратная реализация многофункционального устройства синхронизации

Автоматическое устройство синхронизации содержит блок синхронизации, входы которого связаны с измерительными трансформаторами напряжений подсистем, а выходы подключены к выключателю, связывающему подсистемы.

Блок синхронизации состоит из:

- измеритель частот, напряжений и угла разности фаз между векторами напряжений;
- анализатор состояния, который проверяет, выполняются ли условия точной синхронизации, если выполняются, то он подает сигнал на включение объединяющего выключателя;
- сумматор вычисляет отклонения от условий синхронизации, т.е. ошибку регулирования;
- регулятор вырабатывает управляющий сигнал ошибки на ее устранение;

3.4 Заключение по главе 3

Для успешной реализации устройства автоматической синхронизации необходимо соблюдать основные принципы, которые подробно разобраны в данной главе. В разработанной структурно-функциональной схеме устройства автоматической синхронизации заложены основные принципы построения систем синхронизации. Разработанная структурно-функциональная схема способна реализовать процесс управления при синхронизации энергорайона с энергосистемой.

Глава 4. Моделирование процесса автоматической синхронизации выделенных энергорайонов с сетью энергосистемы

Для получения представления о процессах, протекающих в энергосети, а также для проверки правильного функционирования алгоритма управления, разработана модель исследуемой части энергосистемы в среде MATLAB SIMULINK (рисунок 6).

С помощью разработанной имитационной модели можно выполнить:

- моделирование нормального режима работы исследуемой схемы;
- настройку алгоритма автоматического устройства синхронизации;
- моделирование процесса синхронизации

Модель рассматриваемой электрической сети состоит из следующих основных устройств:

- источник электроэнергии (Three-Phase Source);
- линия электропередачи, параметры блока рассчитаны с помощью программы `power_lineparam` для проводов марки АС 120/19 (Distributed Parameters Line);
- коммутационные устройства (Three-Phase Breaker) с внутренним таймером времени срабатывания и с внешним дискретным входом для приема сигнала;
- измерительный блок мгновенных значений тока и напряжения сети (Three-Phase V-I Measurement);

Моделирование процесса синхронизации происходит за счет срабатывания трехфазного выключателя, который, получая сигнал от устройства синхронизации, включает на параллельную работу энергорайон и энергосистему.

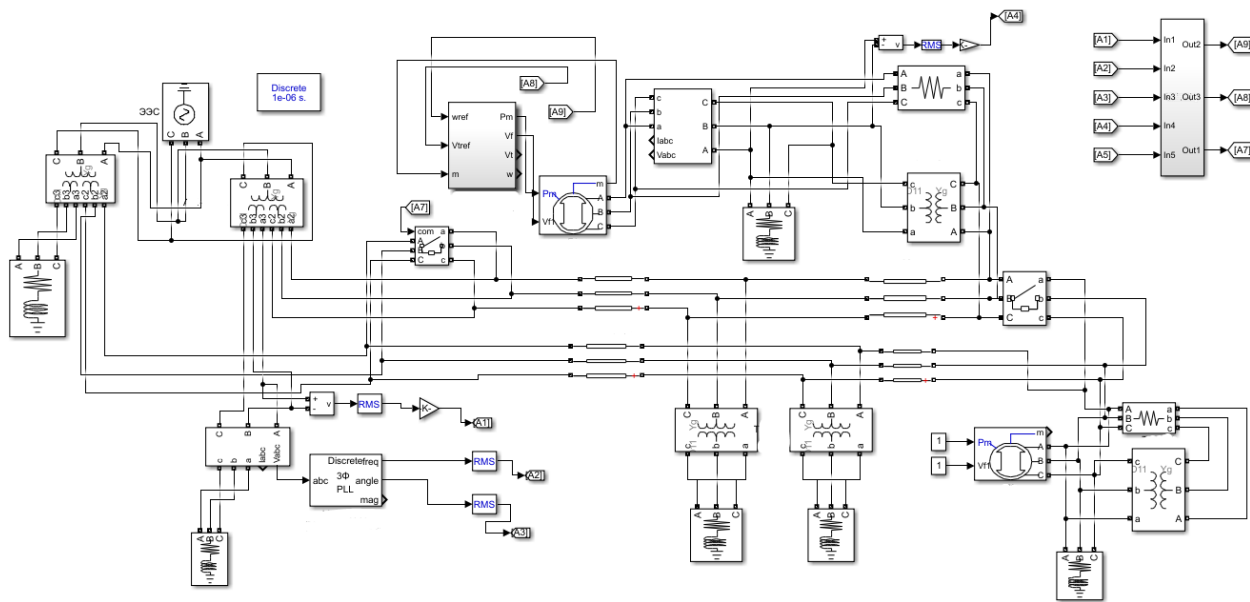


Рисунок 6 – Рабочая модель исследуемой схемы

Алгоритм работы автоматического устройства синхронизации представлен на рисунке 7.

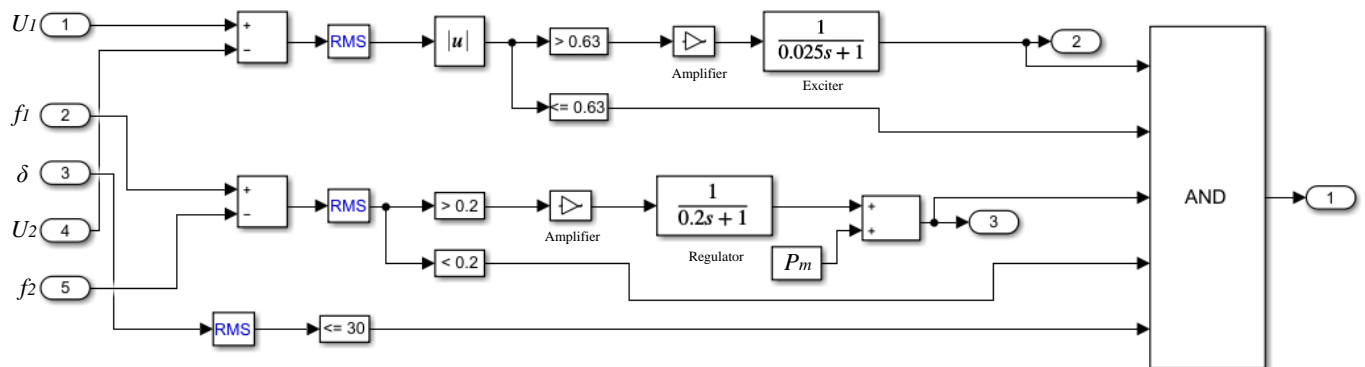


Рисунок 7 – Модель схемы логики, смоделированная в ПК MATLAB
SIMULINK

Схема состоит из четырех основных частей: входные данные, вычислительная часть, логическая часть и выходные данные. Входная часть представляет собой действующие значения напряжений и частот, синхронизируемых объектов, а также угол между векторами напряжений этих объектов. В вычислительных блоках происходит определение отклонений параметров от условий «идеальной» синхронизации. В блоках сравнения

происходит сравнение данных параметров с уставками, которые были рассмотрены ранее. Поступающие аналоговые сигналы преобразовываются в цифровой сигнал, который поступает на выход блока сравнения.

Если отклонение параметров не превышает допустимые, то есть условия синхронизации выполняются, то передается сигнал единица. Если все три условия не соблюдены, то подается сигнал на действие АРВ или/и АРЧВ.

В качестве входного сигнала АРЧВ используется отклонение частоты, поступающее на регулятор, на выходе которого сигнал усиливается с помощью блока *Amplifier*. В результате формируется управляющее воздействие на изменение механической мощности турбогенератора P_m . С помощью модели АРЧВ возможно изменять нагрузку генератора, задаваясь определенными значениями мощности P_m . Блок *Regulator* задается передаточной функцией

$\frac{k_a}{sT_a + 1}$. При моделировании использовались значения коэффициента усиления

$k_a = 1$, постоянная времени усилителя $T_a = 0,2$.

В качестве входного сигнала АРВ используется отклонение напряжения, который так же усиливается с помощью блока *Amplifier*, а затем поступает на возбудитель *Exciter*, который подает сигнал на обмотку возбуждения, тем самым изменяя напряжение. Возбудитель моделируется с коэффициентом $k_e = 1$ и постоянной времени $T_e = 0,025$.

В итоге, в блоке «И» (логическое умножение) объединяются все три сигнала (единицы). Подача сигнала на включение выключателя происходит только в том случае, если соблюдаются все условия синхронизации.

Результаты моделирования представлены на рисунках 8-10.

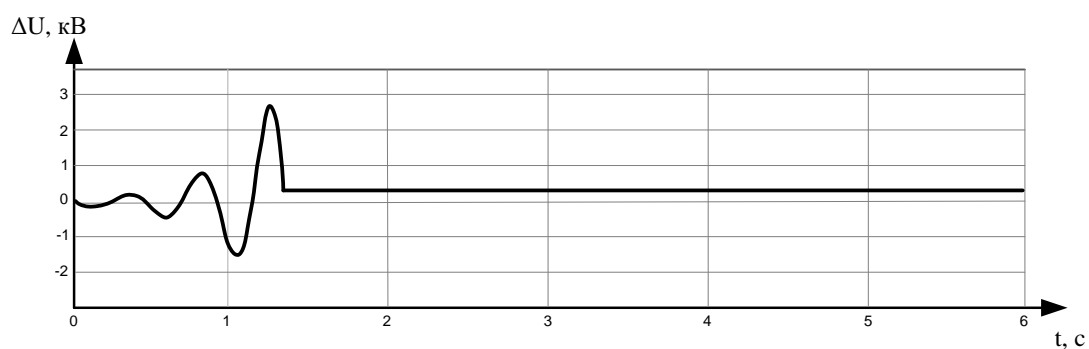


Рисунок 8 – Отклонение напряжений синхронизируемых объектов

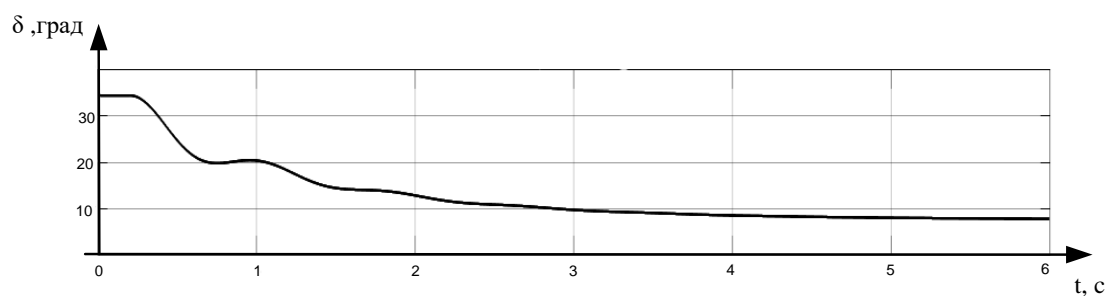


Рисунок 9 – Угол между векторами напряжений синхронизируемых объектов

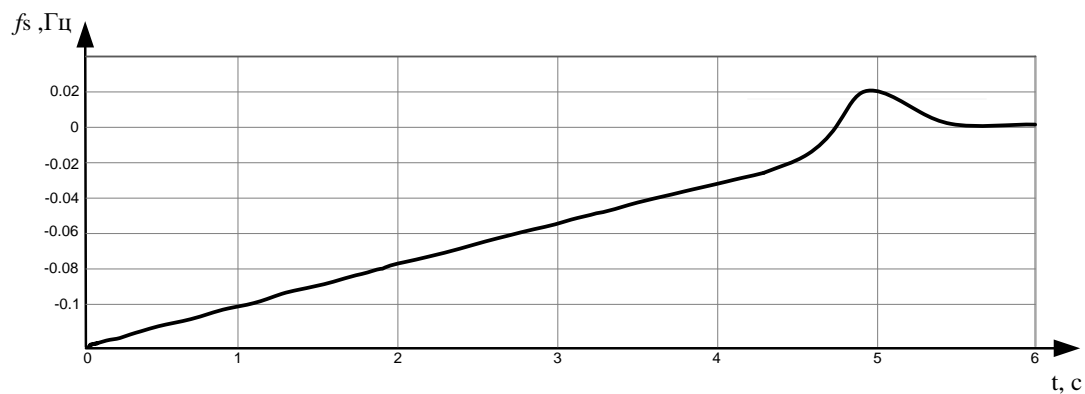


Рисунок 10 – Частота скольжения

Проанализировав графики можно сделать вывод о том, что условия синхронизации были соблюдены с высокой точностью. Это позволило произвести включение на параллельную работу без каких-либо колебаний режимных параметров. Проанализировав графики, можно сделать вывод о том, что время синхронизации составляет приблизительно 4,7 с.

4.1 Основные технические требования к устройству точной синхронизации

Поскольку процесс синхронизации имеет важное значение в энергетике, устройство автоматической точной синхронизации должно отвечать следующим требованиям:

- безотказность и четкость работы алгоритмов на всем временном интервале процесса синхронизации;
- устойчивость качества измерений при функционировании в условиях протекающих переходных процессов;
- единство момента измерения параметров синхронизируемых объектов в случае изменения абсолютных величин;
- помехозащищенность и устойчивость к искажениям исходного сигнала.

4.2 Заключение по главе 4

Исходя из полученных результатов моделирования, можно сделать вывод об успешности управления и возможности проведения процедуры синхронизации с применением предложенных измерительных алгоритмов.

Глава 5. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

Целью данного раздела является расчет технико-экономических показателей для оценки проводимой работы с точки зрения ресурсоэффективности и ресурсосбережения.

В данном разделе будет определена перспективность и успешность научно-исследовательской работы, также осуществится выявление преимуществ информационных технологий для синхронизации частей энергосистем.

Достижение цели обеспечивается решением задач:

- Анализ конкурентоспособности технического решения;
- SWOT-анализ для выявления сильных и слабых сторон проекта;
- Планирование работ;
- Расчет бюджета проекта;
- Определение ресурсной эффективности исследования.

5.1 Анализ конкурентоспособности технического решения

В настоящее время к проекту предъявляются требования экономической эффективности и привлекательности, а также коммерческого потенциала и ресурсоэффективности. Данные требования необходимы для повышения эффективности научно-технического исследования. При проведении научно-технических исследований необходимо сравнивать сильные и слабые стороны данного исследования с исследованиями конкурентов.

Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения позволяет определить на какие стороны научно-технического исследования стоит обратить особое внимание

для их последующего улучшения, а также позволяет осуществить выбор наиболее оптимального варианта.

Для анализа были выбраны два варианта исполнения современных устройств. Первый вариант – это использование ВОЛС, второй вариант – использование FACTS устройств.

Модель экспертной оценки построим по критериям, представленным в таблице 2.

Таблица 2 – Оценочная карта сравнения конкурентных решений

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы		Конкурентоспособность	
		ВОЛС	FACTS устройства	$K_{ВОЛС}$	K_{FACTS}
1	2	3	4	5	6
Технические критерии оценки ресурсоэффективности					
1. Безопасность	0,15	5	5	0,75	0,75
2. Надежность	0,2	5	4	1	0,8
3. Надежность ремонта собственными силами	0,01	5	5	0,05	0,05
4. Функциональная мощность (предоставляемые возможности)	0,17	5	4	0,85	0,68
4. Простота эксплуатации	0,07	5	5	0,35	0,35
6. Качество интеллектуального интерфейса	0,08	5	5	0,4	0,4
Экономические критерии оценки эффективности					
1. Конкурентоспособность продукта	0,05	5	4	0,25	0,2
2. Уровень проникновения на рынок	0,05	4	4	0,2	0,2
3. Цена	0,1	3	3	0,3	0,3
4. Предполагаемый срок эксплуатации	0,08	5	5	0,4	0,4

Продолжение таблицы 2

5. Наличие сертификации разработки	0,04	5	5	0,2	0,2
Итого	1	52	49	4,8	4,33

Анализ конкурентных технических решений определяется по формуле:

$$K = \sum B_i \cdot B_i, \quad (5.1)$$

где K – конкурентоспособность научной разработки или конкурента;

B_i – вес показателя (в долях единицы);

B_i – балл i -го показателя.

Исходя из оценки конкурентоспособности видно, в качестве информационной системы наилучшим будем применение ВОЛС.

5.2 SWOT-анализ

SWOT – Strengths (сильные стороны), Weaknesses (слабые стороны), Opportunities (возможности) и Threats (угрозы) – представляет собой комплексный анализ научно-исследовательской работы. SWOT-анализ применяют для исследования внешней и внутренней среды работы.

Посредством SWOT – анализа можно определить факторы и явления, которые могут ослабить НИР на рынке. Для анализа работы составлена таблица 3.

Для проведения SWOT-анализа опишем сильные и слабые стороны НТИ, и выявим возможности и угрозы для реализации работы, которые проявились или могут появиться в его внешней среде.

Таблица 3 – SWOT – анализ НИР

Возможности внешней среды	Сильные стороны
<p>В1. Поддержка со стороны управляющих ЕЭС организаций (ОАО «ФСК ЕЭС», ОАО «СО ЕЭС»);</p> <p>В2. Высокое качество электроснабжения потребителей;</p> <p>В3. Хорошее техническое оснащение;</p> <p>В4. FACTS устройства, с помощью которых возможно воздействовать на параметры синхронизации.</p>	<p>С1. Полная автоматизация процессов;</p> <p>С2. Обеспечение информацией о режиме и состоянии элементов сети в режиме on-line;</p> <p>С3. Полнота и наглядность предоставляемой информации;</p> <p>С4. Возможность управлять параметрами режима, а не подгонять их и ждать требуемых значений;</p> <p>С5. Сведение к минимуму критических ошибок при управлении.</p>
Угрозы внешней среды	Слабые стороны
<p>У1. Неготовность рабочего персонала к новому подходу и системам;</p> <p>У2. Сокращение инвестиций в модернизацию;</p> <p>У3. Несовместимость устаревших протоколов с новой технологией.</p> <p>У4. Малое использование программ в России; У5. Неблагоприятные климатические условия, ослабляющие сигнал GPS.</p>	<p>Сл1. Требуется высокий уровень развития распределительных сетей.</p>

Наиболее весомым плюсом SWOT-анализа НТИ является обеспечение автоматизации процесса и обеспечение предоставления информации о режиме и состоянии элементов сети в режиме on-line. С помощью использования информационных систем фактор появления человеческой ошибки сводится к минимуму.

Рассматривая слабые стороны, можно сделать вывод, что наибольшее отрицательное влияние оказывает слабый уровень развития распределительных сетей.

Наиболее опасной угрозой внешней среды являются неблагоприятные климатические условия, которые могут создавать помехи для передачи информации, что в свою очередь не даст обеспечить плавность управления параметрами синхронизации, что приведет к неуспешности всего процесса.

Главной возможностью внешней среды является наличие в ней FACTS устройств, благодаря которым возможно управление параметрами синхронизации.

5.3 Планирование работ по НТИ

Планирование НТИ осуществляется составлением календарных планов выполнения комплексов работ, а также определением денежных средств, необходимых для реализации работ, а также трудовых и материальных ресурсов.

Необходимо определить трудоемкость работ каждого участника научного исследования, ведь трудовые затраты составляют основную часть стоимости разработки.

Трудоемкость выполнения научного исследования носит вероятностный характер, так как зависит от множества трудно учитываемых факторов.

Для определения ожидаемого (среднего) значения трудоемкости $t_{ож\ i}$ используется следующая формула:

$$t_{ож\ i} = \frac{3t_{\min i} + 2t_{\max i}}{5}, \quad (5.2)$$

где $t_{ож\ i}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения i -ой работы чел.-дн.;

$t_{\min i}$ – минимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы (оптимистическая оценка: в предположении наиболее благоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.;

$t_{\max i}$ – максимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы (пессимистическая оценка: в предположении наиболее неблагоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.

Примерный порядок составления этапов и работ, распределение исполнителей по данным видам работ представлен в таблице 4.

Таблица 4 – Линейный график работ

Содержание работ	Продолжительность работ, ожид/день			Исполнители
	t_{\min}	t_{\max}	$t_{ож}$	
1. Подготовительный этап				
1.1 Разработка технического задания	1	1	1	Р, инженер
1.2 Определение объема работ	1	3	2	Р
1.3 Составление плана расчета, подготовка литературы и справочных данных	3	10	6	Р, инженер
2. Исследовательская часть				
2.1 Изучение информации о синхронизации частей энергосистем	5	15	9	Инженер
2.2 Изучение возможностей ВОЛС	4	12	7	Инженер
2.3 Изучение возможностей FACTS устройств	4	12	7	Инженер
2.4 Изучение методики расчета возможности применения информационных систем для синхронизации частей энергосистем	4	10	6	Инженер
3. Экспериментальная часть				
3.1 Анализ применимости ВОЛС	3	8	5	Инженер
3.2 Анализ применимости FACTS устройств	8	15	11	Инженер
3.3 Создание отчета по проделанной работе	3	6	4	Инженер
3.4 Согласование с руководителем по проекту	2	3	2	Р, инженер
4. Внесение корректировок в разработки и исследования				
4.1 Корректировка проекта	5	7	6	Инженер
5. Завершающий этап				
5.1 Формирование комплекта документации	9	14	11	Инженер
5.2 Проверка комплекта документации руководителем	3	5	4	Р
5.3 Сдача готового проекта	1	1	1	Инженер
Итого	56	122	82	Р15/инженер 84

В рамках планирования технического проекта необходимо построить диаграмму Ганта, которая показана в Приложении А.

Продолжительность каждой работы в рабочих днях T_p определяется исходя из ожидаемой трудоемкости работ. T_p учитывает параллельность выполнения работ несколькими исполнителями.

$$T_{Pi} = \frac{t_{ожіi}}{Ч_i}, \quad (5.3)$$

где T_{Pi} – продолжительность одной работы, раб.дн.;

$t_{ожіi}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения одной работы, чел.-дн.

$Ч_i$ – численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу на данном этапе, чел.

$$T_{Pi} = \frac{89}{1} = 89 \quad (5.4)$$

Общая продолжительность НТИ составила 89 рабочих дня ($t_{раб}$), при этом не учитывались выходные и праздничные дни. Для учета выходных и праздников переведем рабочие дни в календарные, для перевода воспользуемся формулой:

$$t_{кал} = \frac{t_{раб}}{k_{пер}} = \frac{89}{0,66} = 135 \text{ дней}, \quad (5.5)$$

где $t_{кал}$ – общая продолжительность НТИ в календарных днях;

$t_{раб}$ – общая продолжительность НТИ в рабочих днях;

$k_{пер}$ – переводной коэффициент равный 0,66.

В данном пункте было проведено планирование НТИ. В результате планирования получено, что данную работу выполняют 2 сотрудника: руководитель проекта и инженер, но их деятельность не одновременна.

Была построена диаграмма Ганта, на основе которой определена общая продолжительность работ, составляющая 89 рабочих дней без учета праздничных и выходных дней. С учетом переводного коэффициента из рабочих дней в календарные, продолжительность проекта составляет 135 календарных дня.

5.4 Расчет бюджета НТИ

Бюджет проекта включает в себя следующие группы затрат:

- 1) материальные затраты;
- 2) затраты на оплату труда (основная заработная плата и дополнительная заработная плата);
- 3) отчисления во внебюджетные фонды;
- 4) амортизация;
- 5) накладные расходы.

5.4.1 Расчет материальных затрат

Материальные затраты отражают стоимость ресурсов, полностью потребляемых в течение данного проекта.

Расчет материальных затрат приведен в таблице 5.

Таблица 5 – Расчет материальных затрат

Наименование	Ед. изм.	Кол-во материала, ед.	Цена за ед., руб.	Затраты, руб.
Бумага формата А4	лист	700	0,25	175
Ручка	шт	5	25	125
Карандаши	шт	3	10	30
Картридж ч/б	шт	1	800	800
Итого:				1130

5.4.2 Расходы на оплату труда

Основная заработная плата работников, непосредственно занятых выполнением НТИ, (включая премии, доплаты) и дополнительную заработную плату:

$$З_{\text{зн}} = З_{\text{осн}} + З_{\text{доп}}, \quad (5.6)$$

где $З_{\text{осн}}$ – основная заработная плата, тыс.руб.;

$З_{\text{доп}}$ – дополнительная заработная плата, тыс.руб.;

$З_{\text{зн}}$ – полная заработная плата, тыс.руб.

Месячный должностной оклад работника:

$$З_{\text{м}} = З_{\text{мс}} \cdot (1 + k_{\text{np}} + k_{\text{д}}) \cdot k_{\text{р}}, \quad (5.7)$$

где $З_{\text{мс}}$ – заработная плата по тарифной ставке, руб.;

k_{np} – премиальный коэффициент, равный 0,3 (т.е. 30% от $З_{\text{мс}}$);

$k_{\text{д}}$ – коэффициент доплат и надбавок составляет примерно 0,3;

$k_{\text{р}}$ – районный коэффициент, равный 1,3 (для Томска).

Тарифная заработная плата $З_{\text{мс}}$ находится из произведения тарифной ставки работника: для инженера - 8000, для руководителя - 20000, на тарифный коэффициент $k_{\text{м}}$ и учитывается по единой для бюджетной организации тарифной сетке.

$$З_{\text{м}} = З_{\text{мс}} \cdot (1 + k_{\text{np}} + k_{\text{д}}) \cdot k_{\text{р}} = 8000(1 + 0,3 + 0,3)1,3 = 16640 \text{ руб}, \quad (5.8)$$

$$З_{\text{дн}} = \frac{16440}{21} = 792,4 \text{ руб.} \quad (5.9)$$

Расчет основной заработной платы приведен в таблице 6.

Таблица 6 – Расчет основной заработной платы

Исполнители	$З_{м}$, руб.	$З_{дн}$, руб.	T_p , раб.дн.	$З_{осн}$, руб.	$З_{доп}$, руб.	Итого к выплате, руб.
Инженер	16440	792,4	84	66561,6	13312,32	79873,92
Руководитель	41600	1980,9	15	29713,5	5942,7	35656,2
Итого $З_{зп}$	115530,12 руб.					

5.4.3 Отчисления во внебюджетные фонды

Обязательные отчисления по установленным законодательством нормам в органы государственного социального страхования (ФСС), пенсионного фонда (ПФ) и медицинского страхования (ФФОМС) от затрат на оплату труда работников.

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

$$З_{внеб} = k_{внеб} \cdot (З_{осн} + З_{доп}), \quad (5.10)$$

где $k_{внеб}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и пр.).

В соответствии с Федеральным законом от 24.07.2009 №212-ФЗ установлен размер страховых взносов равный 30%. На основании пункта 1 ст.58 закона №212-ФЗ для учреждений, осуществляющих образовательную и научную деятельность в 2014 году вводится пониженная ставка – 27,1%.

$$З_{внеб} = 0,271 \cdot 115530,12 = 31308,7 \text{ руб.} \quad (5.11)$$

5.4.4 Амортизационные отчисления

Амортизация основных фондов – сумма амортизационных отчислений на полное восстановление основных производственных фондов, вычисленная исходя из их балансовой стоимости и утвержденных норм амортизации. Корректно при расчете затрат учитывать в году приобретения и в последующие годы только ту часть затрат, которая происходит от старения основных фондов в каждом году.

Рассчитаем амортизацию компьютерной техники ($I_{ам.комп.}$). Для расчета амортизации оборудования воспользуемся формулой:

$$I_{ам.комп.} = \frac{T_{исп.к}}{365} \cdot K_{комп} \cdot H_a, \quad (5.12)$$

где $T_{исп.к}$ – время использования компьютера;

$K_{комп}$ – стоимость компьютера;

H_a – норма амортизации.

$$H_a = \frac{1}{T_{ср}}, \quad (5.13)$$

где $T_{ср}$ – срок службы компьютера, год.

$$I_{ам.комп.} = \frac{T_{исп.к}}{365} \cdot K_{комп} \cdot H_a = \frac{84}{365} \cdot 40000 \cdot \frac{1}{7} = 1095,89 \text{ руб.} \quad (5.14)$$

Результаты расчета сведем в таблицу 7.

Таблица 7 – Затраты на амортизацию оборудования

Наименование оборудования	$K_{комп}$, руб.	$T_{исп.к}$, дней	$I_{ам.комп.}$, руб.
Ноутбук Lenovo G580 с ПО	40000	84	1095,89

5.4.5 Накладные расходы

Накладные расходы – расходы, к которым относятся налоги, сборы, отчисления в специальные внебюджетные фонды, платежи по обязательному страхованию имущества, вознаграждения за изобретение и рационализаторские предложения, за подготовку кадров, оплата услуг связи и т.д. Эти затраты составляют 16% от всех издержек и вычисляются по формуле:

$$I_{\text{накл}} = I_{\text{мат}} + ЗП + З_{\text{внеб}} + I_{\text{ам.комп.}} = 0,16 \cdot (1130 + 115530,12 + 31308,7 + 1095,89) = 23850,4 \quad (5.15)$$

5.5 Формирование бюджета затрат на разработку проекта

Рассчитаем себестоимость проекта ($K_{\text{проекта}}$):

Таблица 8 – Смета бюджета

Виды затрат	Сумма затрат, руб.
Материальные затраты	1130
Амортизация компьютерной техники	1095,89
Затраты на оплату труда	115530,12
Отчисления во внебюджетные фонды	31308,7
Накладные расходы	23850,4
Себестоимость проекта	172915,11

Бюджет завтра проекта включает в себя материальные затраты (1130 руб.), амортизацию компьютерной техники (1095,89 руб.), зарплату на оплату труда инженера и руководителя проекта (115530,12 руб.), отчисления во внебюджетные фонды (45430,2руб), которые составили 27,1% от полной

зарплаты работников, и накладные расходы (23850,4 руб.), которые составляют 16% от всех издержек. Бюджет проекта составил 172915,11 рублей.

5.6 Анализ и оценка научно-технического уровня НИР

Оценка научной ценности, технической значимости и эффективности проекта производится с помощью расчета коэффициента научно-технического уровня. Расчет коэффициента производится методом балльных оценок, суть которого состоит в присвоении каждому из признаков научно-технического уровня определенного количества баллов по принятой шкале. Общую оценку можно сделать, просуммировав количество баллов по всем признакам с учетом весовых характеристик. Общая оценка рассчитывается по формуле:

$$HTU = \sum_{i=1}^n k_i \cdot P_i,$$

где k_i – весовой показатель i – го признака;

P_i – количественная оценка i – го признака.

Таблица 9 – Весовые коэффициенты НТУ

Признаки НТУ	Весовой коэффициент
Уровень новизны	0,4
Теоретический уровень	0,4
Возможность реализации	0,2

Таблица 10 – Шкала оценки новизны

Баллы	Уровень
1-4	Низкий НТУ
5-7	Средний НТУ
8-10	Сравнительно высокий НТУ
11-14	Высокий НТУ

Таблица 11 – Значимость теоретических уровней

Характеристика значимости теоретических уровней	Баллы
Установка законов, разработка новой теории	10

Продолжение таблицы 11

Глубокая разработка проблем, многосторонний анализ, взаимозависимость между факторами	8
Разработка способа (алгоритм, вещество, устройство, программы)	6
Элементарный анализ связей между факторами (наличие гипотезы, объяснение версий, практические рекомендации)	2
Описание отдельных факторов (вещества, свойств, опыта, результатов)	0,5

Таблица 12 – Возможность реализации по времени и масштабам

Время реализации	Баллы
Уже реализуется, но есть много недостатков	8
В течение первых лет	6
От 5 до 10 лет	4
Свыше 10 лет	2
Масштабы реализации	Баллы
Одно или несколько предприятий	2
Отрасль	4
Народное хозяйство	10

$$k_1 = 0,4, \quad \Pi_1 = 11, \quad k_2 = 0,4, \quad \Pi_2 = 8,$$

$$k_3 = 0,2, \quad \Pi_3 = 8, \quad k_4 = 0,2, \quad \Pi_4 = 2.$$

$$НТУ = 0,4 \cdot 11 + 0,4 \cdot 8 + 0,2 \cdot 8 + 0,2 \cdot 2 = 9,6 \quad (5.16)$$

По результатам расчета коэффициента научно-технического уровня видно, что данная научно-исследовательская работа имеет высокую значимость теоретического и практического уровня, но при этом для возможности ее использования только необходимо современное техническое оснащение.

5.7 Заключение по главе 5

В данном разделе выпускной квалификационной работы представлен план выполнения работы, произведена оценка трудоемкости работы, а также была рассчитана стоимость затрат. С помощью SWOT - анализа научно-исследовательского проекта были выявлены сильные и слабые стороны проекта.

По диаграмме Ганта определена общая продолжительность работ, составляющая 87 рабочих дней без учета праздничных и выходных дней. С учетом переводного коэффициента из рабочих дней в календарные, продолжительность проекта составляет 135 календарных дня.

Стоимость затрат научно-исследовательской работы составляет 172915,11 рублей.

В результате комплексного SWOT - анализа было выявлено, что данная работа обладает большими преимуществами, несмотря на наличие слабых сторон и угроз. Во-первых, синхронизация частей энергосистем происходит в автоматическом режиме. Во-вторых, интерфейс комплексов ВОЛС и FACTS устройств позволяет получать значения параметров режима on-line, что очень удобно для диспетчера.

По полученным результатам расчета коэффициента научно-технического уровня данная работа имеет высокую значимость теоретического и практического уровня, но при этом для возможности ее использования только необходимо современное техническое оснащение.